

# АКТИВНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ – ИСТОЧНИК НАПЯЖЕНИЯ С ГИСТЕРЕЗИСНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Г.Г.Жемеров, О.И.Ковальчук

Национальный Технический Университет

«Харьковский Политехнический Институт»

Кафедра «Промышленная и биомедицинская электроника»,

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21, НТУ «ХПИ»,

Тел./факс: (057) 707-63-12, E-mail: zhemerov@online.kharkiv.net

**Annotation** – In this paper the feature of the electromagnetic processes in the AR are considered, and rated ratios for selection of the parameters of the circuit components and for definition of the drift limits of the modulation frequency of the AR, supplied with a hysteresis control system are obtained.

**Key words** - Active rectifier, hysteresis control system, modulation frequency, pumping energy.

## ВВЕДЕНИЕ

Активные выпрямители – источники напряжения (АВИН) в последние десятилетия находят широкое применение благодаря малоэлементности силовой схемы и хорошей электромагнитной совместимости с питающей сетью [1], [2]. Несмотря на кажущуюся простоту силовой схемы, расчет величины эквивалентной индуктивности реактора в фазе АВИН и емкости фильтрующего конденсатора на выходе, выбор типа системы управления и частоты широтно-импульсной модуляции (ШИМ) требуют тщательного анализа электромагнитных процессов в АВИН, в частности, анализа механизма «закачки» энергии в выходной конденсатор и нагрузку при работе АВИН в режиме повышающего преобразователя.

Целью настоящей работы является получение расчетных соотношений для выбора параметров элементов схемы и определения пределов изменения частоты модуляции АВИН, снабженного гистерезисной системой управления.

## СХЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ – ИСТОЧНИКОМ НАПЯЖЕНИЯ

Схема электроснабжения АВИН с гистерезисной системой управления, приведена на рис. 1. Мост состоящий из шести транзисторно-диодных ключей  $T1 - T6$ ,  $D1 -$

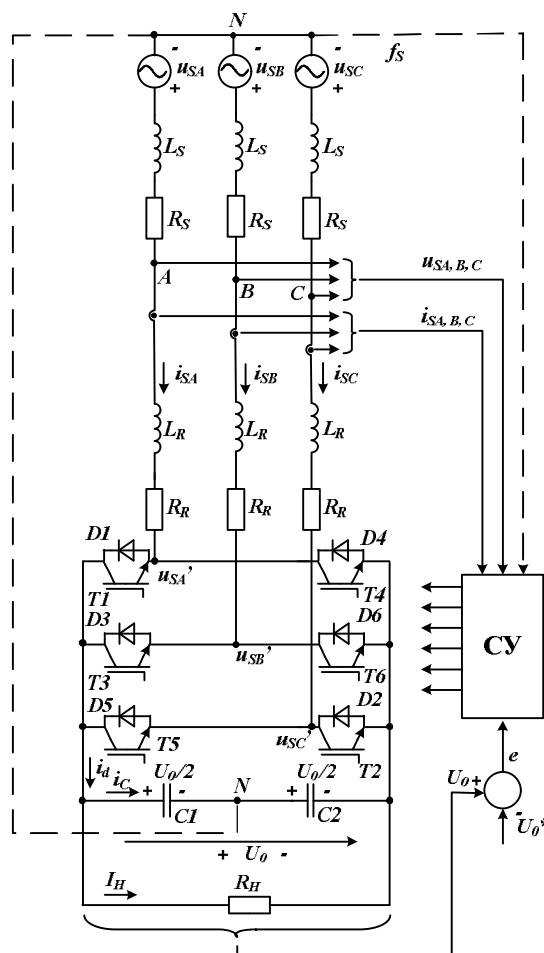


Рис. 1. Система электроснабжения с АВИН

$D6$ , подключен к клеммам  $A, B, C$  трехфазной промышленной сети синусоидальных симметричных напряжений  $u_{SA}, u_{SB},$

$u_{SC}(\vec{u}_S)$ , через реакторы  $L_R$  в каждой из трех фаз.

На выходе АВИН включен фильтрующий конденсатор, напряжение на котором в процессе работы поддерживается неизменным. Емкость конденсатора выбирается достаточно большой так, чтобы высокочастотные пульсации не превышали 3 – 5% от среднего значения напряжения на выходе,  $U_0$ . АВ может подключаться к трехфазной сети с помощью трехпроводной и четырехпроводной линии. В последнем случае на выходе АВ включают последовательно два конденсатора одинаковой емкости, общая точка которых подключается к нулевому проводу сети как показано на рис. 1 пунктиром. Специальный регулятор, не показанный на рис. 1, поддерживает равенство напряжений на последовательно включенных конденсаторах.

Система гистерезисного управления (СУ), показанная на рис. 2, вырабатывает импульсы управления транзисторов. На вход системы управления подаются сигналы датчиков трех фазных напряжений,  $u_{SA}, u_{SB}, u_{SC}$ , трех фазных токов  $i_{SA}, i_{SB}, i_{SC}$ , а также сигнал с выхода пропорционально-интегрального звена, на вход которого подается сигнал рассогласования между напряжением задания  $U_0^*$  и фактическим напряжением на выходе  $U_0$ :

$$e = U_0^* - U_0. \quad (1)$$

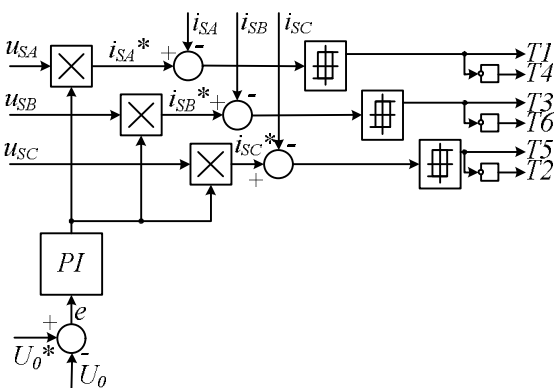


Рис. 2. Система гистерезисного управления АВ

Частота импульсов управления, подаваемых в гистерезисной системе на транзисторы, зависит от величины мгновенно-

го напряжения фазы сети, от порога чувствительности гистерезисного элемента, который обычно выбирается равным нескольким процентам от амплитуды номинального значения фазного тока задания, и от индуктивности реактора,  $L_R$ .

АВ средней и большой мощности обладают КПД близким к единице. Поэтому при рассмотрении электромагнитных процессов в схеме можно, при необходимости, пренебречь омическим сопротивлением источника  $R_S$  и омическим сопротивлением реактора  $R_R$ , а также допустить, что транзисторные ключи идеальны.

Будем рассматривать схему АВ с нулевым проводом.

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ АВ

Введем понятие идеального АВ, обладающего следующими свойствами:

- сетевые токи  $i_{SA}, i_{SB}, i_{SC}$  идеального АВ синусоидальны и совпадают по фазе с синусоидальными фазными напряжениями  $u_{SA}, u_{SB}, u_{SC}$ ;
- величины суммарной индуктивности,  $L_\Sigma$ , и суммарного активного сопротивления,  $R_\Sigma$ , в цепи переменного тока стремятся к нулю:

$$L_\Sigma = L_S + L_R \rightarrow 0, \quad (2)$$

$$R_\Sigma = R_S + R_R \rightarrow 0; \quad (3)$$

- напряжение на выходном конденсаторе,  $U_0$ , неизменно во времени;
- потери энергии в элементах силовой схемы отсутствуют.

Особенностью АВ его является принципиальная неработоспособность при нулевой индуктивности в цепи переменного тока. Действительно, при  $L_\Sigma = 0$  невозможна «накачка» энергии в конденсатор на выходе, так как напряжение на конденсаторе превышает амплитуду напряжения источника. Отметим, что максимальная величина суммарной индуктивности,  $L_{\Sigma max}$ , ограничена величиной допустимого падения напряжения на ней от протекания основной гармоники сетевого тока в соответствии с векторной диаграммой, приведенной на рис. 3.

Амплитуда падения напряжения на омическом сопротивлении фазы определяется КПД АВ и составляет примерно  $(0,03 - 0,05)U_{Sm}$ .

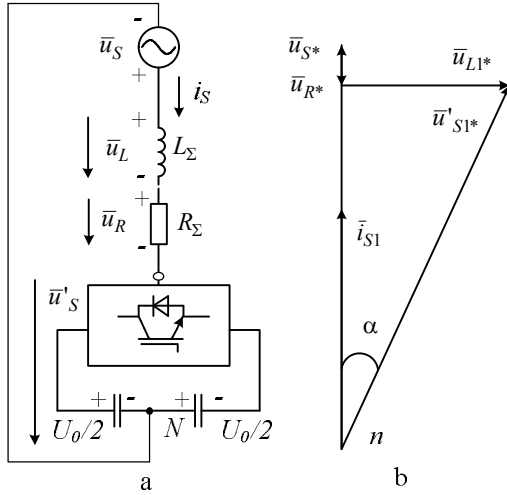


Рис. 3. К определению предельного значения суммарной индуктивности:  
а) эквивалентная схема одной фазы АВ;  
б) векторная диаграмма.

Амплитуда основной гармоники напряжения на входе моста  $U'_{S1m}$  может быть определена с учетом рис. 3 и рис. 4, на котором показаны напряжения  $u_S'$  и  $u_L$  в периоде модуляции,  $T_{mod}$ , в области максимума напряжения  $u_S$ .

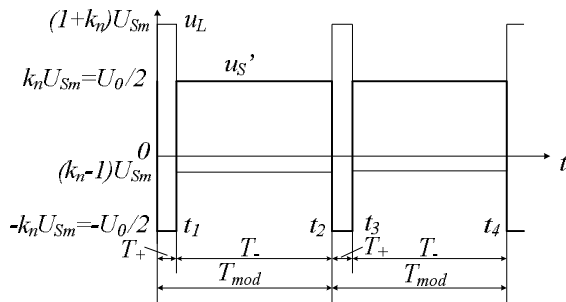


Рис. 4. Напряжение на входе моста  $u_S'$  и на реакторе  $u_L$  в периоде модуляции

Графики напряжений на рис. 4 построены при  $k_n=1,3$ . В соответствии с рис. 4 амплитуда основной гармоники напряжения на выходе моста,  $U'_{S1m}$ , равна среднему значению напряжения  $u_S'$  в периоде модуляции, привязанном по времени к максимуму напряжения сети  $u_S$ :

$$U'_{S1m} = \frac{-k_n U_{Sm} T_+ + k_n U_{Sm} T_-}{T_{mod}}. \quad (4)$$

Интервал «закачки» энергии в реактор

$$T_+ = \frac{2L_\Sigma \Delta I_S}{(k_n+1)U_{Sm}}, \quad (5)$$

где  $\Delta I_S$  – величина максимального отклонения тока фазы от синусоидального тока задания.

Интервал отбора энергии из реактора

$$T_- = \frac{2L_\Sigma \Delta I_S}{(k_n-1)U_{Sm}}. \quad (6)$$

Из рис. 4:

$$T_{mod} = T_+ + T_-. \quad (7)$$

После подстановки (5) и (6) в (7) получим:

$$T_{mod} = \frac{2L_\Sigma \Delta I_S}{U_{Sm}} \frac{2k_n}{k_n^2-1}. \quad (8)$$

Из (5) и (8)

$$\frac{T_+}{T_{mod}} = \frac{k_n-1}{2k_n}. \quad (9)$$

Из (6) и (8)

$$\frac{T_-}{T_{mod}} = \frac{k_n+1}{2k_n}. \quad (10)$$

Подставим в (4) соотношения (9) и (10), после преобразования получим:

$$U'_{S1m} = U_{Sm}, \quad (11)$$

то есть, амплитуда основной гармоники фазного напряжения на входе транзисторного моста тождественно равна амплитуде фазного напряжения источника и не зависит от параметра  $k_n$ . Учитывая (11), несложно построить векторную диаграмму, приведенную на рис. 3, б. Угол  $\alpha$  и относительная величина основной гармоники напряжения на клеммах реактора определяются из соотношений:

$$\alpha = \arccos(1 - U_{R*}), \quad (12)$$

$$\text{где } U_{R*} = \frac{U_R}{U_{Sm}}, \quad (13)$$

$$U_{L1m*} = \frac{U_{L1m}}{U_{Sm}} = \sin \alpha. \quad (14)$$

На рис. 5 представлены зависимости предельных значений относительного максимума основной гармоники напряжения на реакторе и угла  $\alpha$  между  $\bar{u}_S$  и  $u_S'$  от относительного значения амплитуды основной гармоники напряжения на активном сопротивлении фазы  $R_\Sigma$ .

Принципиально АВ может работать в трех режимах, существенно отличающихся между собой. Первые два режима возникают, если прекращается подача отпирающих импульсов на транзисторы, то есть, при превращении силовой схемы АВ в схему неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром на выходе. В зависимости от величины напряжения на кон-

денсаторе, ток на выходе диодного моста (рис. 1) имеет прерывистый характер в первом из трех режимов и непрерывный характер во втором. Характеристики АВ в первых двух режимах рассмотрены в [3]. При работе АВ в третьем режиме транзисторы переключаются с частотой модуляции, превышающей частоту напряжения сети на 1-2 порядка, а напряжение на выходе  $U_0$  поддерживается на уровне, превышающем амплитуду линейного напряжения сети.

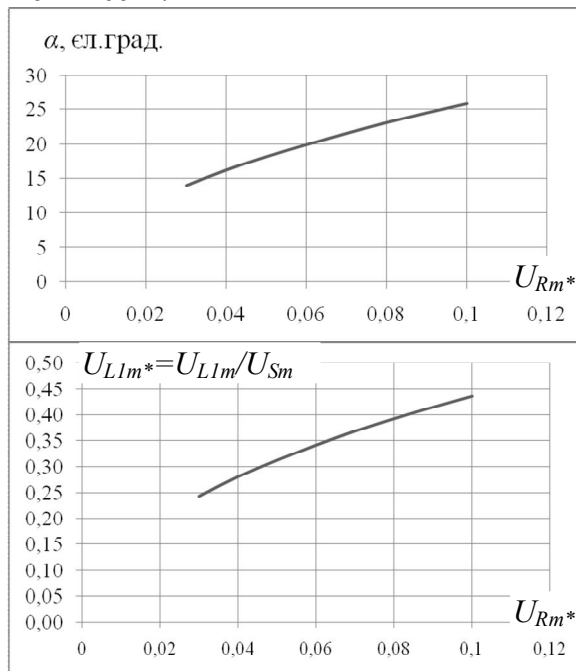


Рис. 5. Предельные значения максимума основной гармоники напряжения на реакторе

Третий из перечисленных режимов, являющийся основным режимом АВ, рассматривается в настоящей работе. Будем анализировать идеальный АВ, учитывая, однако, несинусоидальность фазных токов и потери энергии в элементах схемы в тех случаях, когда их неучет может привести к существенным погрешностям.

Принимаем, что в установившемся режиме работы периодом повторяемости электромагнитных процессов в АВ является полупериод фазного напряжения питающей сети  $T_s/2$ . Это допущение не вносит существенной погрешности, поскольку частота модуляции на 1-2 порядка больше частоты сети

$$f_{mod} \gg f_s, \quad (15)$$

а средний ток нагрузки  $I_0$  – медленно изменяющаяся функция времени, остающийся практически неизменным в течение периода напряжения источника  $u_s$ . При работе АВ в установившемся режиме мгновенные и средние активные мощности связаны соотношениями

$$p_s = p_{Load} + p_{Loss} = P_s = P_{Load} + P_{Loss}, \quad (16)$$

$$p_s = u_{SA}i_{SA} + u_{SB}i_{SB} + u_{SC}i_{SC} = const \quad (17)$$

- мгновенная активная мощность источника;

$$p_{Load} = U_0 I_0 \quad (18)$$

- мгновенная активная мощность нагрузки;

$$P_s = \frac{3}{2} U_{Sm} I_{S1m} \quad (19)$$

- средняя активная мощность источника;

$U_{Sm}$  – амплитуда фазного синусоидального напряжения источника;

$I_{S1m}$  – амплитуда основной гармоники фазного тока источника;

$$p_{Loss} = P_{Loss} = \frac{3}{2} R_\Sigma I_{S1m}^2 + \Delta P_{tr} \quad (20)$$

- соответственно мгновенная и средняя за период мощности потерь, где

$$R_\Sigma = R_s + R_r, \quad (21)$$

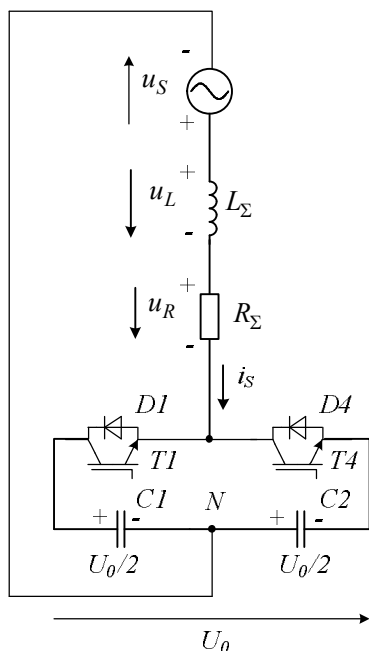
-  $\Delta P_{tr}$  – мощность потерь в транзисторных ключах.

Соотношения (16) и (17) свидетельствуют о постоянной скорости передачи энергии от источника в нагрузку. Нетрудно показать, что и суммарная энергия, запасенная в трех реакторах, индуктивность которых равна  $L_R$  (рис. 1), не изменяется во времени, оставаясь равной:

$$E_R = \frac{3}{4} L_R I_{S1m}^2. \quad (22)$$

Приведенные выше соотношения не объясняют механизма «закачки» энергии из трехфазного источника синусоидальных напряжений с амплитудным значением линейного напряжения  $\sqrt{3}U_{Sm}$  в параллельно включенные конденсатор и нагрузку, напряжение на которых в 1,3 – 1,5 раз больше. Очевидно, что этот механизм подобен механизму «закачки» энергии в нагрузку повышающего преобразователя постоянного напряжения в постоянное, хотя процессы в этих типах преобразова-

Рассмотрим подробнее работу одной фазы АВ в интервале модуляции,  $T_{mod}$ . Эквивалентная схема фазы АВ представлена на рис. 7, кривая фазного тока  $i_S$  – на рис. 8.



Как следует из рис. 8 переключение транзисторов  $T1$  и  $T4$  происходит в момент времени, когда фактический ток становится больше суммы токов задания  $i_S^*$  и заданного отклонения тока  $\Delta I_S$  или меньше их разности:

$$\left. \begin{array}{l} i_s > i_s^* + \Delta I_s (\text{включается Т1}), \\ i_s < i_s^* - \Delta I_s (\text{включается Т4}). \end{array} \right| \quad (23)$$

В зависимости от знака фазного напряжения и от пути тока через транзисторы или диоды возможны четыре состояния эквивалентной схемы, представленной на рис. 7. Эти варианты сведены в таблицу 1.

Номера включенных транзисторов	Номер варианта. Путь фазного тока. Знаки $u_S (i_S)$ , $u_L$	
	$u_S > 0, i_S > 0$	$u_S < 0, i_S < 0$
$T1$	1. $u_L = u_S - \frac{U_0}{2} < 0$ Диод $DI$ , конденсатор $CI$	2. $u_L = u_S - \frac{U_0}{2} < 0$ Конденсатор $CI$ , транзистор $T1$
$T4$	3. $u_L = u_S + \frac{U_0}{2} > 0$ Транзистор $T4$ , конденсатор $C2$	4. $u_L = u_S + \frac{U_0}{2} > 0$ Конденсатор $C2$ , диод $D4$

В первом состоянии эквивалентной схемы (рис. 7 и табл. 1) при  $u_S > 0$ , напряжение  $u_L$  отрицательно, ток  $i_S$  положителен и убывает, энергия источника и реактора  $L_\Sigma$  передается в конденсатор  $C1$  и нагрузку, ток замыкается через диод  $D1$  и конденсатор  $C1$ .

Во втором состоянии эквивалентной схемы при  $u_S < 0$ , напряжение  $u_L$  отрицательно, ток  $i_S$  отрицателен и убывает, энергия источника и конденсатора  $C1$  передается в реактор  $L_\Sigma$ , ток протекает через конденсатор  $C1$  и транзистор  $T1$ .

В третьем состоянии эквивалентной схемы при  $u_S > 0$ , напряжение  $u_L$  положительно, ток  $i_S$  положителен и увеличивается, энергия источника и конденсатора  $C2$  передается в реактор, ток замыкается через транзистор  $T4$  и конденсатор  $C2$ .

Наконец, в четвертом состоянии эквивалентной схемы при  $u_S < 0$ , напряжение  $u_L$  положительно, ток  $i_S$  отрицателен и увеличивается, - производная тока при выбранном на рис. 7 положительном направлении тока  $i_S$ , - положительна, энергия передается из сети и реактора в конденсатор  $C2$ , ток замыкается через конденсатор  $C2$  и диод  $D4$ .

На рис. 8 указаны соответствующие варианты состояния эквивалентной схемы в двух интервалах времени –  $T_+$  и  $T_-$  при  $u_S > 0$ ,  $i_S > 0$ .

Из табл. 1 следует, мгновенная активная мощность одной фазы источника всегда положительна, то есть, энергия непрерывно забирается из питающей сети и передается в реактор или конденсатор в зависимости от состояния транзисторов  $T1$  и  $T4$ .

В установившемся режиме работы АВ можно рассматривать два накладывающихся друг на друга процесса: один – на частоте сети, другой – на частоте модуляции. Для первого процесса справедливы соотношения (16) – (23) и соотношения, связывающие величины напряжения источника и напряжения на выходе АВ:

$$U_0 = k\sqrt{3}U_{Sm}, \quad (24)$$

$$\frac{U_0}{2} = k_n U_{Sm}, \quad (25)$$

$$k = \frac{2}{\sqrt{3}} k_n. \quad (26)$$

Этот процесс обеспечивает передачу части энергии из источника в нагрузку без обмена энергией между трехфазной сетью и тремя реакторами [4] так, что суммарная энергия, запасенная в трех реакторах остается постоянной (22).

Вторая часть энергии передается на частоте модуляции с «закачкой» энергии из сети в реактор и с последующей передачей энергии сети и запасенной энергии реакторов в нагрузку.

Важным параметром АВ с гистерезисной системой управления является частота модуляции, которую можно рассчитать несколькими способами.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ МОДУЛЯЦИИ В АВ С ГИСТЕРЕЗИСНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Очевидно, что в АВ, снабженном гистерезисной системой управления, частота модуляции изменяется в зависимости от четырех параметров: мгновенного фазного напряжения, суммарной индуктивности в фазе

$$L_\Sigma = L_S + L_R, \quad (27)$$

величины гистерезиса релейного регулятора тока,  $\Delta I_S$ , и коэффициента  $k$ , определяемого по соотношению (24), то есть, напряжения на выходе  $U_0$ .

Расчетное соотношение для определения частоты модуляции можно получить, сделав допущение, что в интервале времени, равном периоду модуляции

$$T_{mod} = \frac{1}{f_{mod}}, \quad (28)$$

напряжение и ток сети остаются неизменными.

Вернемся к рис. 8. В интервале времени  $T_+$  включен транзистор  $T4$ , ток  $i_S$  возрастает, реактор накапливает энергию. Длительность интервала

$$T_+ = \frac{2L_\Sigma \Delta I_S}{u_S + \frac{\sqrt{3}}{2} k U_{Sm}}. \quad (29)$$

В интервале времени  $T_-$  (рис. 8) включен транзистор  $T1$ , ток  $i_S$  уменьшается, реактор отдает энергию. Длительность интервала

$$T_- = \frac{2L_{\Sigma}\Delta I_S}{-u_S + \frac{\sqrt{3}}{2}kU_{Sm}}. \quad (30)$$

Длительность интервала модуляции определяем, суммируя (29) и (30):

$$T_{mod} = T_+ + T_- = \frac{2\sqrt{3}kL_{\Sigma}\Delta I_S U_{Sm}}{-u_S^2 + \frac{3}{4}k^2 U_{Sm}^2}. \quad (31)$$

Текущую частоту модуляции определяем из (28) и (31):

$$f_{mod} = \frac{-u_S^2 + \frac{3}{4}k^2 U_{Sm}^2}{2\sqrt{3}kL_{\Sigma}\Delta I_S U_{Sm}}. \quad (32)$$

Минимальная текущая частота модуляции соответствует максимуму напряжения сети. Подставив  $u_S = U_{Sm}$  в (32), получим:

$$f_{modmin} = \frac{(-1 + \frac{3}{4}k^2)U_{Sm}}{2\sqrt{3}kL_{\Sigma}\Delta I_S}. \quad (33)$$

Максимальная текущая частота модуляции соответствует  $u_S = 0$ :

$$f_{modmax} = \frac{\sqrt{3}kU_{Sm}}{8L_{\Sigma}\Delta I_S}. \quad (34)$$

Отношение максимальной частоты модуляции к минимальной определяем из (33) и (34):

$$\frac{f_{modmax}}{f_{modmin}} = \frac{3k^2}{4(-1 + \frac{3}{4}k^2)}. \quad (35)$$

Из соотношения (35) следует, что отношение максимальной частоты модуляции к минимальной зависит только от коэффициента  $k$ . На рис. 9 представлена зависимость отношения максимальной частоты модуляции к минимальной от коэффициента  $k$ , из которой видно, что оптимальное значение параметра  $k$  в АВ лежит в диапазоне от 1,4 до 1,6.

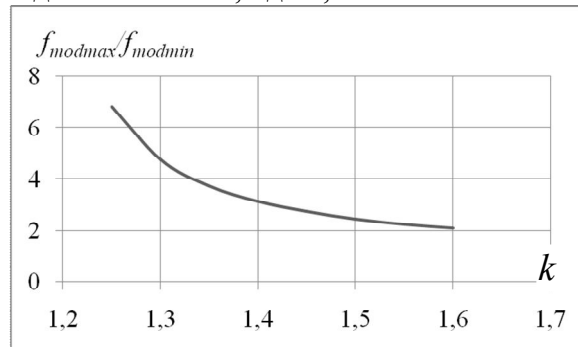


Рис. 9. Отношение максимальной частоты модуляции к минимальной

В работе [5] предложен другой способ определения частоты модуляции в АВ с гистерезисной системой управления, основанный на расчете частоты модуляции

как суммы четырех составляющих. Сопоставление формул для максимальной и минимальной частот в настоящей работе и в работе [5] показывает, что они совпадают с точностью до обозначений.

Как было установлено выше в интервалах  $T_+$  реактор накапливает энергию, в интервалах  $T_-$  отдает энергию. Представляет интерес оценка количества энергии, проходящей по пути из источника в нагрузку через реактор – назовем эту энергию энергией «накачки».

### ЭНЕРГИЯ «НАКАЧКИ»

Энергия, забираемая в интервале  $T_+$  из конденсатора  $C2$  в реактор

$$E_{C+} = \frac{U_0}{2} i_S T_+. \quad (36)$$

Энергия, отдаваемая реактором в конденсатор

$$E_{C-} = \frac{U_0}{2} i_S T_-. \quad (37)$$

Из (36), (37) и рис. 8 следует неравенство:

$$E_{C-} > E_{C+}, \quad (38)$$

свидетельствующее о «накачке» энергии из реактора в конденсатор.

Суммарную для трех фаз мгновенную активную мощность «накачки» определим как отношение энергии переданной в конденсатор к соответствующему периоду модуляции, равному сумме двух интервалов:

$$P_{pump\Sigma} = u_{SA} i_{SA} \frac{T_{-A}-T_{+A}}{T_{-A}+T_{+A}} + u_{SB} i_{SB} \frac{T_{-B}-T_{+B}}{T_{-B}+T_{+B}} + u_{SC} i_{SC} \frac{T_{-C}-T_{+C}}{T_{-C}+T_{+C}}. \quad (39)$$

Поскольку напряжения  $u_S$  и токи  $i_S$  изменяются с частотой намного меньшей частоты модуляции, мощность «накачки» не изменяется во времени. Поэтому в соотношении (39) можно взять три значения  $u_S$  и  $i_S$  в любой момент времени. Наиболее удобно рассматривать момент времени, соответствующий положительному максимуму напряжения фазы  $A$ . В этом случае

$$\left. \begin{aligned} u_{SA} &= U_{Sm}, \\ i_{SA} &= I_{Sm}, \\ u_{SB} &= u_{SC} = -\frac{1}{2}U_{Sm}, \\ i_{SB} &= i_{SC} = -\frac{1}{2}I_{Sm}. \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Из соотношений (29), (30), (32), (39) и (40) после преобразований получим:

$$P_{pump} = \frac{5}{2\sqrt{3}k} U_{Sm} I_{Sm}. \quad (41)$$

Из (14) и (41) находим:

$$P_{pump*} = \frac{P_{pump}}{P_S} = \frac{5}{3\sqrt{3}k} = \frac{0,962}{k}. \quad (42)$$

На рис. 10 представлена зависимость относительного значения мощности «накачки» от параметра  $k$ .

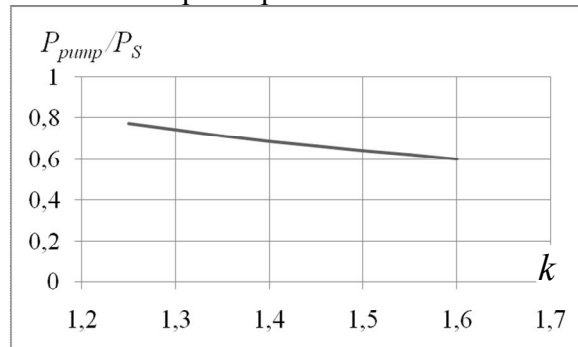


Рис. 10. Относительная величина мощности «накачки»

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

*MatLab*-модель эквивалентной схемы системы электроснабжения с активным выпрямителем номинальной мощностью 10 MW приведена на рис. 11.

Модель состоит из одиннадцати блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:

- Силовая схема – блоки 1, 3, 5, 6, 8, 9;
- Система управления – блок 7;
- Датчики тока и напряжения – блоки 2, 4;
- Многолучевые осциллографы – блок 10;
- Вспомогательные блоки – блок 11.

Назначение блоков силовой схемы:

1 – блок напряжения питающей сети, моделирующий трехфазную систему синусоидальных напряжений с возможностью задания действующего значения линейного напряжения питающей сети;

3 – блок суммарной индуктивности цепи;

5 – блок суммарного омического сопротивления цепи;

6 – блок активного выпрямителя, выполненный по шестипульсовой мостовой

схеме с возможностью задания параметров IGBT-транзисторов, снабберов и обратных диодов;

8 – блок выходных конденсаторов АВ;

9 – блок нагрузки, моделирующий однофазную активную нагрузку.

Система управления активным выпрямителем (блок 7) приведена на рис. 12. Система управления осуществляет выработку управляющих импульсов транзисторов АВ. Все сигналы, циркулирующие в системе управления, представлены в относительных единицах. В блоке *Frequency defined system* определяются минимальная, максимальная и средняя частоты модуляции. Датчики тока и напряжения осуществляют измерения фазных токов и напряжений питающей сети (блоки 2, 4), тока и напряжения нагрузки, напряжений на суммарной индуктивности и суммарном омическом сопротивлении цепи, напряжение на входе моста. Все эти данные выводятся на многолучевые осциллографы (блок 10). В блоке 11 выводится на многолучевой осциллограф основная гармоника напряжения сети, основная гармоника напряжения на суммарном омическом сопротивлении цепи, основная гармоника напряжения на суммарной индуктивности цепи и основная гармоника напряжения на входе моста. Последние два сигнала получают путем пропускания через полосовой фильтр сигналов соответствующих напряжений.

В результате проведения эксперимента подтверждено тождество (11), то есть, амплитуда основной гармоники фазного напряжения на входе транзисторного моста тождественно равна амплитуде фазного напряжения источника и не зависит от параметра  $k_n$ .

В таблице 2 приведены экспериментальные данные, подтверждающие справедливость выражений (32) – (34) для определения максимальной и минимальной текущей частоты модуляции и зависимости отношения максимальной частоты модуляции к минимальной от параметра  $k$ , равного отношению напряжения на выходе моста к амплитуде линейного





Таблица 2 – Теоретические и экспериментальные значения максимальной и минимальной частоты модуляции

$k$	$L, H$	$\Delta I_S$	$f_{max}, Hz$		$f_{min}, Hz$		$f_{max}/f_{min}$	
			расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.
1,3	0,000251	0,05	7266	7034	1534	1350	4,7	5,2
		0,03	12111	11770	2556	2311	4,7	5,1
		0,01	36332	35240	7668	6576	4,7	5,4
1,4		0,05	7825	7637	2502	2383	3,1	3,2
		0,03	13042	12750	4170	3907	3,1	3,3
		0,01	39127	38140	12510	11650	3,1	3,3
1,5		0,05	8384	8197	3416	3294	2,5	2,5
		0,03	13974	13690	5693	5449	2,5	2,5
		0,01	41921	40920	17079	16240	2,5	2,5
1,6		0,05	8943	8877	4285	4155	2,1	2,1
		0,03	14905	14640	7142	6912	2,1	2,1
		0,01	44716	43820	21427	20630	2,1	2,1

отношения напряжения на выходе к амплитуде линейного напряжения сети.

4. Отношение максимальной частоты модуляции к минимальной однозначно определяется параметром отношения напряжения на выходе к амплитуде линейного напряжения сети, оптимальное значение этого параметра составляет 1,4 – 1,6.

5. В установившемся режиме энергия сети передается в нагрузку активного выпрямителя двумя потоками, один из которых минует входные реакторы, а другой проходит через них. Отношение величин этих потоков однозначно определяется параметром отношения выходного напряжения к амплитуде линейного напряжения сети.

[1] Jose R. Rodriguez, Juan W. Dixon, Jose R. Espinoza, Jorge Pontt, Pablo Lezan, "PWM Regenerative rectifiers: state of the art", IEEE Transactions on Industrial electronics, vol. 52, no. 1, pp. 5-22, 2005.

[2] The Chen, Josep M. Guerrero, Frede Blaabjerg. "A review of the state of the art of power electronics of wind turbines". IEEE Trans. on PE, vol. 24, no 8, 2009, pp. 1859-1875.

[3] Г.Г. Жемеров, О.И. Ковальчук. Характеристики мощного шестипульсного мостового неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром. Научно-практический журнал «Электротехника і електромеханіка» – 2011. – №1. – С. 19-24.

[4] Г.Г Жемеров, Д.В. Тугай. Мгновенные и средние активные и реактивные мощности в линейных цепях с синусоидальными напряжениями. Вестник НТУ «ХПИ», серия «Электроника и электропривод», вып. 43, Харьков, 2004, сс. 153 – 160.

[5] Г.Г Жемеров, В.Ю. Колесник. Частота модуляции сетевого тока в активном управляемом выпрямителе – источнике напряжения с гистерезисной системой управления. Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. Част. 3, Київ, 2008, сс. 79-84.